

高温环境下旋转型行波超声电机性能研究

郑伟, 朱春玲, 芦丹, 丁庆军, 赵淳生

(南京航空航天大学精密驱动研究所, 江苏省南京市 210016)

Research on Characteristic of Traveling Wave Type Rotary Ultrasonic Motors Under High Temperature

ZHENG Wei, ZHU Chun-ling, LU Dan, DING Qing-jun, ZHAO Chun-sheng

(Precision Driving Laboratory of Nanjing University of Aeronautic and Astronautic, Nanjing 210016, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: Traveling wave rotary ultrasonic motors (TRUM) are a new kind of driver that is fit for the need of space navigation. It is necessary to get motor's mechanical characteristic under such abnormal environment as high temperature condition. In this study, the mechanical characteristics of TRUM are tested under high temperature environment. Obtained results show that speed of TRUM drops but torque of TRUM rises under high temperature condition. At 70 °C, the maximum torque of TRUM appears. At 80 °C, torque trends to decrease. In order to explain the reason that mechanical characteristics of TRUM change under high temperature condition, characteristics of some components of TRUM are analyzed under different temperature conditions. It is indicated that the characteristics of TRUM's stator and PZT under the high temperature condition increase speed and torque of TRUM. On the other hand, the friction between stator and rotor under that condition decreases the speed. It is TRUM's pro-press that increase speed and decrease torque under high temperature condition.

KEY WORDS: traveling wave rotary ultrasonic motor; high temperature condition; mechanical characteristics; lead zirconate titanate; pro-press

摘要: 行波型超声电机适合用于宇航搭载设备驱动器, 因此必须对其进行包括高温环境的特殊环境下的性能研究。通过对行波型旋转型超声电机在高温环境下进行了机械性能测试, 得到了超声电机高温环境机械特性: 超声电机的空载转速有所下降, 但最大力矩随着温度的升高而增大, 在 70 °C 时, 超声电机的堵转力矩达到最大, 在 80 °C 时, 堵转力矩微降。分析了超声电机各个部件在不同温度环境下性能的变化

对超声电机机械特性的影响: 电机定子和压电陶瓷在高温环境下对电机的力矩和转速有提升作用; 定、转子的摩擦界面在高温环境下对电机的力矩和转速起降低作用; 预压力使超声电机的力矩起增加, 但使电机转速下降。

关键词: 超声电机; 高温环境; 机械性能; 压电陶瓷; 预压力

0 引言

旋转型行波超声电机是利用压电陶瓷(lead zirconate titanate, PZT)的压电逆效应把电能转换为机械能后, 通过摩擦作用把PZT的振动转换为转子的转动, 从而输出转动和力矩。超声电机与传统的电磁电机相比较, 具有重量轻、低转速、输出大力矩和响应速度快等特点, 适合航空航天领域的使用, 因此, 超声电机技术的发展非常迅速^[1], 包括各种形式的超声电机及驱动器的研究^[2-5]。超声电机在包括高温环境的特殊环境下性能变化, 是超声电机在使用前必须进行的研究项目之一。美国NASA已经把超声电机应用于太空装置, 并工作在-253~+500 °C的环境下^[6]。超声电机应用在太空手中, 同样也进行了高温环境试验研究^[7]。但这些研究只有试验结论的报道, 对超声电机在高温环境下的机械特性等试验的具体细节没有进行阐述。

环境温度的变化对超声电机的速度、力矩的影响非常大, 有学者在超声电机压电陶瓷方面做了研究^[8-11], 但主要是针对超声电机本身工作发热, 导致压电陶瓷温度的上升, 从而产生了超声电机速度不稳。文献[12-13]对超声电机在高温环境下的空转转速和堵转力矩进行了试验, 并从超声电机的定/转子的摩擦解释了该现象。本文针对自主研制的超声电机, 进行了高温环境试验, 得到了超声电机在

基金项目: 国家自然科学基金项目(90405010)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (90405010).

高温环境下的机械特性；通过理论和试验相结合的方法，分析了超声电机的各个部件在不同温度下对超声电机性能的影响。对进一步研制非常态环境下的超声电机提供指导方向。

1 试验设备和方法

1.1 高温试验设备

高温试验设备采用意大利ACS公司生产的CH1200C高低温湿热箱。该试验箱的操作温度范围为 $-70\sim 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，温度均匀度 $\leq 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，温度波动度 $\leq \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，温度偏差 $\leq \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，升温速率为电加热，全程 $5.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，内部有效容积 $1\ 152\text{ L}$ 。

高温环境下，进行试验的样机为本研究所自主研制的 $\phi 60$ 旋转型行波超声电机。定子采用铜基材料，转子摩擦材料为高分子聚合材料。超声电机工作频率为 39 kHz ，控制方式为速度跟踪反馈。

1.2 试验方案

高温环境试验的试验温度依次为室温($25\text{ }^{\circ}\text{C}$)、 50 、 60 、 70 和 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。试验结束，恢复室温($25\text{ }^{\circ}\text{C}$)后检测超声电机的性能。在试验过程中，记录超声电机的机械特性。为保证负载和转速转矩记录仪的正常工作，转速转矩仪和负载放到高温试验箱外，如图1所示。



图1 高温环境试验装置系统
Fig. 1 Testing system under the high temperature condition

2 试验结果和分析

2.1 高温环境下超声电机机械特性

在高温环境下，超声电机进行机械特性的测量，其结果如图2所示。从图中看出，随着温度的升高，超声电机的转速下降，但力矩有所增大。在 $50\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温环境下，超声电机的性能变化较小。

当高温环境试验结束，超声电机在常温下静置 8 h 后，测量其机械特性。与进行高温环境试验前的机械特性相比较，当负载较大时(试验中负载力矩达到 $0.7\text{ N}\cdot\text{m}$)，转速下降更快，但在小负载的情况下，机械特性变化不大。

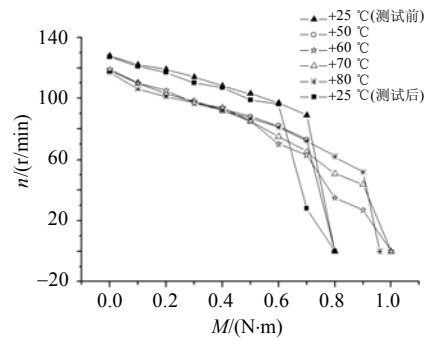


图2 不同环境温度下超声电机机械特性
Fig. 2 Mechanical characteristics of TRUM under different high temperature condition

超声电机的空载转速变化见图3。随着温度从室温升高到 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，超声电机的转速下降约 9% ，但在 $50\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内，最大转速变化不大。

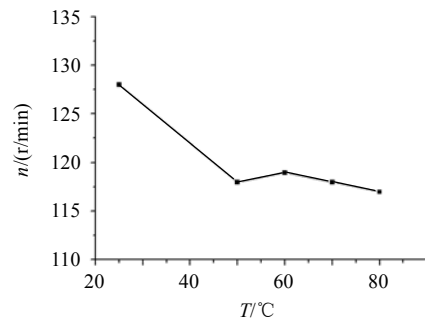


图3 高温环境下超声电机最大转速
Fig. 3 Most speed of TRUM under different high temperature condition

高温环境下，超声电机最大力矩的变化规律图4所示。当环境温度在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 前，最大力矩变化不大，但环境温度达到 $60\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，最大力矩明显上升，上升幅度达 25% ，且达到最大值。但环境温度上升到 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，最大力矩又呈下降趋势。

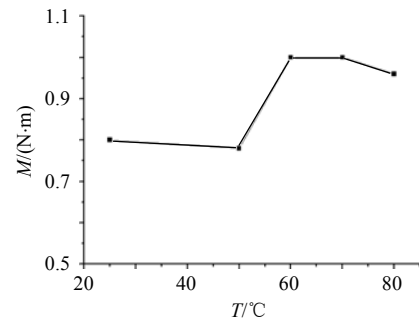


图4 高温环境下超声电机最大力矩
Fig. 4 Largest torque of TRUM under different high temperature condition

2.2 试验结果分析

2.2.1 不同温度环境下超声电机输出力矩变化分析

为分析超声电机输出力矩的变化，首先从超声电机定子的工作机理入手。旋转型行波超声电机定子主体结构为压电层和简化的园板结构，假设其位

移场符合 Kirchhoff 薄板理论, 则定子弯曲振动时, 其参考中性层的位移可以按 Ritz 法离散化, 根据电机工作时, 定子仅被压电陶瓷激励出 m 条节径的两同频正交模态 $B0m$, 因此模态坐标缩减为 2 个, 模态坐标 \mathbf{q} 为

$$\mathbf{q} = [q_1 \ q_2]^T = [A_S \cos \omega_m t \ A_S \sin \omega_m t]$$

式中 A_S 为模态坐标的幅值。则旋转型行波超声电机定子上任意点沿定子圆周径向、周向和纵向位移分别为^[14]

径向位移:

$$u_s = A_S F_{su}(r, z) \cos(\omega_m t - m\theta) \quad (1)$$

周向位移:

$$v_s = mA_S F_{sv}(r, z) \sin(\omega_m t - m\theta) \quad (2)$$

纵向位移:

$$w_s = A_S F_{sw}(r) \cos(\omega_m t - m\theta) \quad (3)$$

式中 $F_{su}(r, z)$ 、 $F_{sv}(r, z)$ 、 $F_{sw}(r)$ 是与径向、纵向位置坐标有关的函数部分:

$$\begin{cases} F_{su}(r, z) = -z \frac{\partial F_s(r)}{\partial r} \\ F_{sv}(r, z) = -\frac{z}{r} F_s(r) \\ F_{sw}(r) = F_s(r) \end{cases}$$

式中 $F_s(r)$ 为径向上的位移分布函数。

式(1)~(3)中, 为了分析超声电机定子对超声电机机械特性的影响, 假设定子位移形函数不变, 这时主要研究 A_S 的影响。

根据弹性力学, 定子的在压电陶瓷激励下, 应力应变关系为

$$\begin{cases} \varepsilon_x = [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] / E \\ \varepsilon_y = [\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)] / E \\ \varepsilon_z = [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] / E \\ \gamma_{yz} = \tau_{yz} / 2\mu \\ \gamma_{zx} = \tau_{zx} / 2\mu \\ \gamma_{xy} = \tau_{xy} / 2\mu \end{cases} \quad (4)$$

式中: E 为杨氏模量; ν 为泊松比。不考虑高温环境对压电陶瓷的影响, 即压电陶瓷的驱动应力不变。由于 ε 、 σ 和 E 是本构关系, 由于温度的变化, 导致了弹性模量 E 、 σ 和 ε 的变化。这时 A_S 的值为由(4)决定, 且 $A_S \propto 1/E$ 。

计算在不同环境温度下, 弹性材料弹性模量的公式为

$$E = E_0 [1 + \beta_E (t - t_0)] \quad (5)$$

式中 β_E 为弹性模量温度系数。

某青铜的弹性模量温度系数为 $\beta_E = -4.6 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$, 铜的弹性模量 $E = (103 \sim 127) \times 10^5 \text{ MPa}$ ^[15]。

设电机环境温度从 25°C 升高到 80°C , 弹性模量变化率由式(5)计算 2.5%。因为 $A_S \propto 1/E$, 从式(1)~(3)知位移变大。

然后, 分析压电陶瓷在高温环境下性能的变化。应用静态测量法测量压电陶瓷在不同高温环境下的 d_{33} 。测量试验时, 电压表采用 HP34401A 测量, 并联电容为 $2.2 \mu\text{F}$ 。用静态法测量存在误差, 但在常温和高温环境下, 用同样方法测量, 其误差值基本相同, 取 d_{33} 值变化的相对比率, 从而减小了误差。试验原始数据如图 5。发现随着环境温度的上升, 压电陶瓷 d_{33} 也上升。在 80°C 高温环境下 d_{33} 约为常温环境下的 150%。结合定子弹性模量变化, 定子行波振幅变大的倍数约为 54%, 为压电陶瓷和定子的影响。

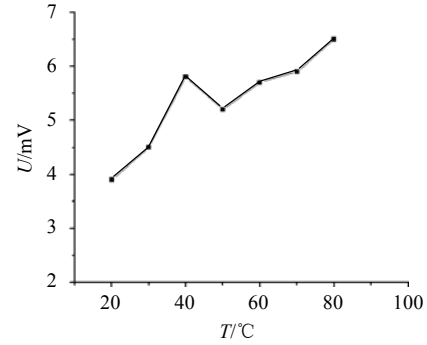


图 5 静态法测量压电陶瓷 d_{33} 的测量值

Fig. 5 d_{33} of PZT based on static state measurement

再分析高温环境下摩擦界面的变化。旋转型行波超声电机转子的输出力矩是定子的振动通过与转子摩擦层的摩擦产生的。在弹性范围内, 把转子摩擦层假设为弹簧, 则摩擦层的法向接触力和摩擦层变形量成正比, 切向摩擦力满足库仑摩擦理论^[14], 有

$$f_{n1} = k_n x \quad (6)$$

$$f_\tau = \mu_d f_n \quad (7)$$

式中: f_n , f_τ 分别为分布式法向接触力和切向力, 法向接触力 f_n 包括定子波型对摩擦材料的作用力和超声电机的预压力 $f_n = f_{n1} + f_{n2}$, f_{n1} 为定子变形后, 对转子施加的压力; f_{n2} 为电机的预压力; k_n 为摩擦层的等效分布式弹簧的刚度系数; x 为摩擦层的接触变形量, 当温度升高, 由上面分析知道, 定子振幅变大, 则转子的变形 x 变大, 振幅变大约 54%, 则 f_{n1} 增大 54% (先假设摩擦层刚度系数不变)。

现在分析预压力 f_{n2} 的变化情况。应用应变片测量超声电机在不同温度下预压力变化。将应变片贴在转子上, 通过转子的应变间接测量加在转子上预

压力,其结果为随着温度上升,预压力也上升。在80℃时,转子的应变相对于20℃上升了54%。此值包含了在高温下,由于转子材料弹性模量的变化引起的转子应变,因此该值比实际预压力增大的值大,但预压力在高温环境下变大的趋势是一定的,即 f_{n2} 上升,但上升倍数小于54%。

然后对摩擦系数的变化分析。在高温环境试验中,当温度升高至某一值后,定/转子界面摩擦材料物理化学性能发生变化,随温度的升高,分子热运动加剧,摩擦结点的剪切阻力减小,摩擦材料的硬度降低,表面迅速氧化,形成表面污染膜,降低摩擦副分界面的剪切强度极限,使摩擦系数降低^[13]。式(7)中, μ_d 为定/转子的摩擦界面摩擦系数,根据文献[13]的测算,高温环境下,摩擦系数约下降20%。在本试验中,由于缺乏在高温环境下测量超声电机转子摩擦材料的手段。因此,对高温环境试验前,在常温环境下,对进行试验的超声电机转子摩擦材料测量摩擦系数,摩擦系数为0.17;高温试验结束后,在常温环境下测量超声电机转子摩擦系数则下降到0.11。

再看式(6)中的 k_n , k_n 为摩擦层的等效分布式弹簧的刚度系数,由于摩擦系数下降相同的原因,摩擦材料的弹性模量和硬度降低^[13],因此 k_n 下降,但由于试验条件的限制,该现象只是在摩擦材料的试验过程中感性认识到,无法定量测量。

从式(7)看出, f_i 由 f_n 和 μ_d 决定,结合以上分析, f_{n1} 增大54%和 μ_d 的减小20%,该因素对输出力矩影响约增大20%。 f_{n2} 增大值小于54%和 μ_d 的减小20%,则该预压力对输出力矩影响的增大值小于20%,超声电机总体输出力矩的变化为以上两项之和。本次试验结果超声电机输出力矩增大25%。以上还有如下因素没有量化分析,即在高温环境下,摩擦材料的弹性模量下降导致 f_{n1} 增幅没有到达54%。

2.2.2 不同环境下,超声电机速度变化分析

首先分析定子和压电陶瓷变化对超声电机速度的影响。在高温环境下,压电陶瓷的 d_{33} 上升。其在80℃高温环境下压电陶瓷 d_{33} 为常温环境下的150%。根据式(5),超声电机定子弹性模量减小了2.5%,结合定子弹性模量变化,定子行波振幅变大的倍数约为54%,为压电陶瓷和定子的影响。对式(1)~(3)求导,则速度

$$\dot{u} = -m\omega_m A_S F_{su}(r, z) \sin(\omega_m t - m\theta) \quad (8)$$

$$\dot{v}_s = m\omega_m A_S F_{sv}(r, z) \cos(\omega_m t - m\theta) \quad (9)$$

$$\dot{w} = -\omega_m A_S F_{sw}(r) \sin(\omega_m t - m\theta) \quad (10)$$

如果不考虑其它因素的影响,由式(8)~(10)以及2.1.1节分析知,速度应增加54%,即为定子弹性模量变化和压电陶瓷对速度变化贡献。

在电机装配过程中,电机转子有一定的预压力,在常温环境下,超声电机的预压力调节到最佳状态。这时,预压力变大或变小都影响超声电机的转速。在理想驱动状态下,定子的行波波顶和转子没有相对转动,在实际调整中,这时的预压力使它们的相对转动达到最小的,随着环境温度的增加,从2.2.1节阐述可知,超声电机转子预压力的增加。预压力的变化对超声电机性能的影响,取另1个无速度跟踪反馈控制的超声电机样机进行了实验分析:调整到最佳预应力的超声电机,预压力增加50N后,转速下降了约3%;调整到最佳预应力的超声电机,预应力减小了35N后,转速下降了约19%。将具有最佳预应力的超声电机在高温环境(70℃)下实验时,转速较常温环境下减小了约30%;而将预压力减小了35N后,高温环境下(70℃)转速只下降了14%,其下降的幅度减小了一半,这说明高温环境下预压力变大,向最佳预压力靠近后,转速下降幅度变小。其理论分析可参考文献[13],随着超声电机预压力的增加,电机的转速下降。

同时,随环境温度的升高,超声电机摩擦材料的变化如2.2.1节分析一样,摩擦材料的分子热运动加剧,摩擦结点的剪切阻力减小,摩擦材料的硬度降低,表面迅速氧化,形成表面污染膜,降低摩擦副分界面的剪切强度极限,使摩擦系数降低,增加了摩擦界面滑动,影响了电机转速,使电机转速下降。由于缺乏在高温环境下测量超声电机转子摩擦材料的手段,因此在常温环境下,对进行高温试验前后的超声电机转子摩擦材料的摩擦系数进行测量,摩擦从0.17下降到0.11。超声电机转子摩擦系数的这种变化对超声电机转速的影响,对其进行了实验,从实验中看出,摩擦系数的变化对转速的影响主要体现在电机带负载情况下。实验表明:当负载小于0.6 N·m时,电机的性能变化很小,当负载从0.6 N·m上升到0.7 N·m时,摩擦系数为0.17的超声电机转速下降了约8%;而摩擦系数为0.11的超声电机转速则下降了约70%。综合以上分析因素,体现在本实验中为:超声电机在高温环境下速度下降了9%。

3 结论

(1) 在高温环境下(80℃),超声电机的转速下

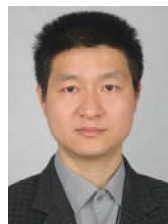
降, 但最大力矩增大。

(2) 环境温度变高时(从 25 °C 上升到 80 °C), 超声电机定子弹簧弹性模量变小、压电陶瓷 d_{33} 变大, 因此超声电机的定子振幅变大, 超声电机输出力矩增大。超声电机的预压力随着温度的升高也逐渐变大, 也增大超声电机输出力矩。但超声电机转子摩擦材料摩擦系数下降又损耗了部分输出力矩。

(3) 当环境温度变高时(从 25 °C 上升到 80 °C), 超声电机定子弹簧弹性模量变小、压电陶瓷 d_{33} 变大, 提高了超声电机定超声电机运行速度; 超声电机转子摩擦材料摩擦系数下降降低了超声电机输出转速; 预压力增大的结果进一步降低了超声电机输出转速。最终超声电机的输出转速下降。

参考文献

- [1] 赵淳生. 世界超声电机技术的新进展[J]. 振动、测试与诊断, 2004, 24(1): 1-5.
Zhao Chunsheng. Recent progress in ultrasonic motor techniques [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2004, 24(1): 1-5(in Chinese).
- [2] 陈超, 赵淳生. 旋转型行波超声电机中三维接触机理的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 149-155.
Chen Chao, Zhao Chunsheng. Study on the three dimensional contact mechanism of traveling wave type rotary ultrasonic motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 149-155(in Chinese).
- [3] 朱华, 陈超, 赵淳生. 一种微型柱体超声电机的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 128-133.
Zhu Hua, Chen Chao, Zhao Chunsheng. Investigation on a cylindrical ultrasonic micromotor[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 128-133(in Chinese).
- [4] 李华峰, 赵淳生. 基于 LC 谐振的超声电机驱动器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(23): 144-148.
Li Huafeng, Zhao Chunsheng. Research on the ultrasonic motor driver based on LC resonant[J]. Proceeding of the CSEE, 2005, 25(23): 144-148(in Chinese).
- [5] 李华峰, 赵淳生. 基于复杂可编程逻辑器件的超声电机小型电源[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 115-118.
Li Huafeng, Zhao Chunsheng. Micro-drive for ultrasonic motor based on CPLD[J]. Proceeding of the CSEE, 2005, 25(7): 115-118(in Chinese).
- [6] Alberta E F, Jiang X, Rehrig P, et al. Actuator materials for extreme environments[C]. International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems and Proceedings, Alta, Canada, 2005.
- [7] Yamad A Y, Morizono T, Sato K, et al. Proposal of a skilmate hand and its component technologies for extravehicular activity gloves [J]. Advanced Robotics, 2004, 18(3): 269-284.
- [8] Xu X, Liang Y C, Lee H P, et al. Mechanical modeling of longitudinal oscillation ultrasonic motors and temperature effect analysis[J]. Smart Materials and Structures, 2003, 12(4): 514-523.
- [9] Morita T, Niino T, Asama H, et al. Fundamental study of a stacked lithium niobate transducer[J]. Japanese Journal of Applied Physics, Part 1 (Regular Papers, Short Notes & Review Papers), 2001, 40(5): 3801-3806.
- [10] Takahashi S, Sasaki Y, Umeda M, et al. Characteristics of piezoelectric ceramics at high vibration levels[C]. Materials for Smart Systems III. Symposium, Boston, 1999.
- [11] 周飞, 龙纪文, 孟中岩. 铌掺杂 PMS-PZ-PT 三元系压电陶瓷温度稳定性研究[J]. 无机材料学报, 2004, 19(3): 586-592.
Zhou Fei, Long Jiwen, Meng Zhongyan. Temperature stability of Nb-doped PMS-PZ-PT ceramics[J]. Journal of Inorganic Materials, 2004, 19(3): 586-592(in Chinese).
- [12] 曲建俊, 程显敏, 罗云霞, 等. 超声波马达的真空和温度特性研究[J]. 光学精密工程, 2006, 13(3): 324-331.
Qu Jianjun, Cheng Xianmin, Luo Yunxia, et al. Performance of ultrasonic motor under vacuum and high temperature condition [J]. Optics and Precision Engineering, 2005, 13(3): 324-331(in Chinese).
- [13] 曲建俊, 罗云霞, 于佳庆. 真空度和温度对超声马达特性的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(6): 848-851.
Qu Jianjun, Luo Yunxia, Yu Jiaqing. Effects of degree of vacuum and temperature on properties of ultrasonic motor[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(6): 845-851(in Chinese).
- [14] 陈超. 旋转型行波超声电机理论模型的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
Chen Chao. Study on theoretical model of traveling wave type rotary ultrasonic motor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005(in Chinese).
- [15] 刘九卿. 称重传感器弹性元件金属材料的选择与分析[J]. 衡器, 2001, 30(5): 10-16.
Liu Jiuqing. Analysis and choice of elastic metallic material on weight sensor[J]. Weight, 2001, 30(5): 10-16(in Chinese).



郑 伟

收稿日期: 2007-12-25。

作者简介:

郑 伟(1970—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为超声电机非常态下性能研究, fzzwei-2000@yahoo.com.cn。

(责任编辑 丁玉瑜)